

4 Schwingfestigkeitsuntersuchungen

4.1 Schwingfestigkeit von Grundwerkstoff, Schweißgut und Wärmeeinflusszone

4.1.1 Elastisch-plastisches Materialverhalten im ungekerbten Zustand unter Dehnungssteuerung

Der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung unter zügiger und zyklischer Belastung ist in den σ - ϵ -Kurve für den Grundwerkstoff, Bild 4.1, das Schweißgut, Bild 4.2, und die Wärmeeinflusszone, Bild 4.3, der warmausgehärteten Legierung AlMgSi1 T6 (AW-6082 T6) dargestellt.

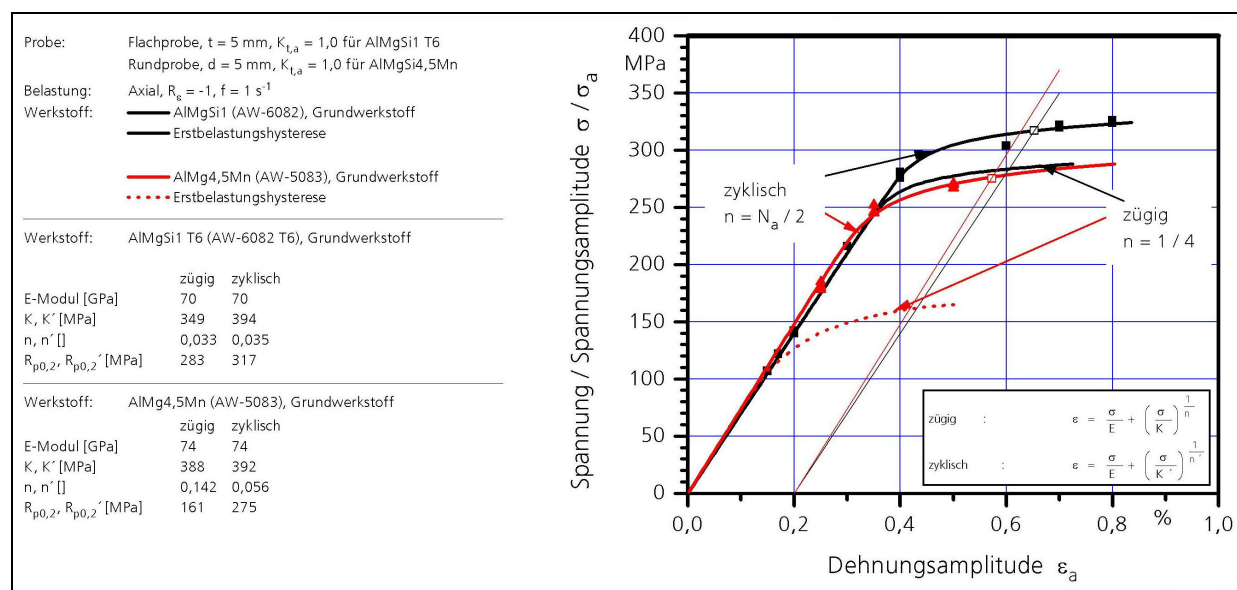


Bild 4.1: Spannungs-Dehnungskurven - Grundwerkstoff

Die zügige σ - ϵ -Kurve (gestrichelte Linie) entspricht der Erstbelastungskurve und ist mit der Kurve aus dem Zugversuch vergleichbar. Die zyklische σ - ϵ -Kurve (durchgezogene Linie) ergibt sich aus den bei halber Anrisschwingspielzahl, also als stabilisiert angenommenen Werkstoffzustand, ermittelten Dehnungs- und dazugehörigen Spannungsamplituden, welche aus der jeweiligen Hystereseschleife bestimmt werden.

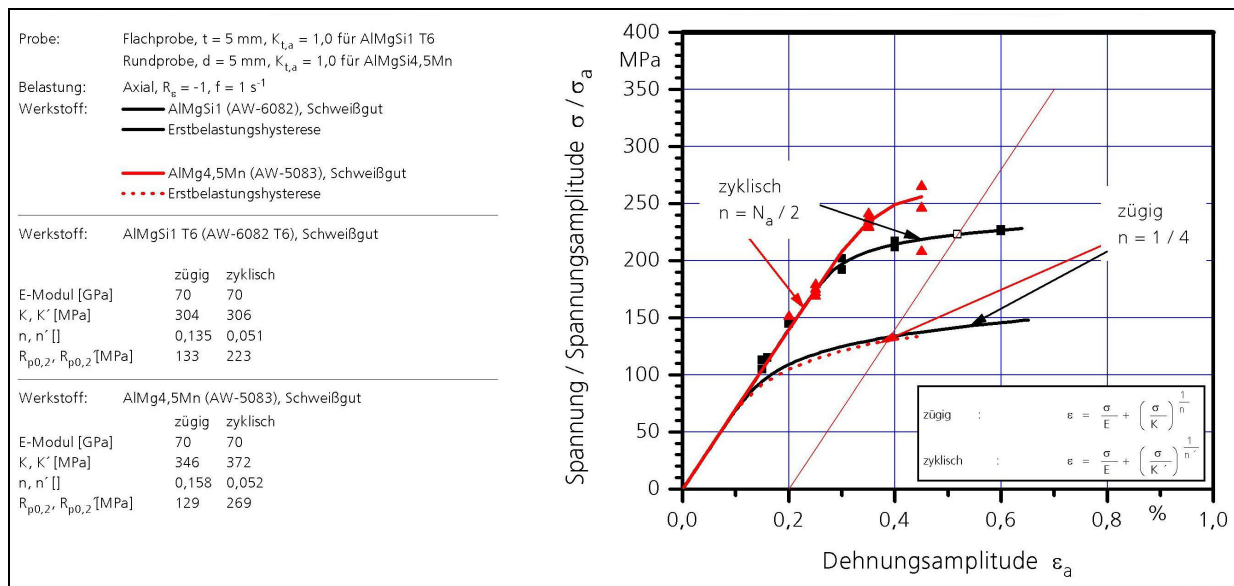


Bild 4.2: Spannungs-Dehnungskurven - Schweißgut

Infolge der zyklischen Beanspruchung setzt eine zyklische Verfestigung des ungeschweißten und geschweißten Werkstoffs, sowie der Wärmeeinflusszone ein, d. h. bei gleich bleibender Dehnungsamplitude erhöht sich die Spannung im Vergleich zur Erstbelastung.

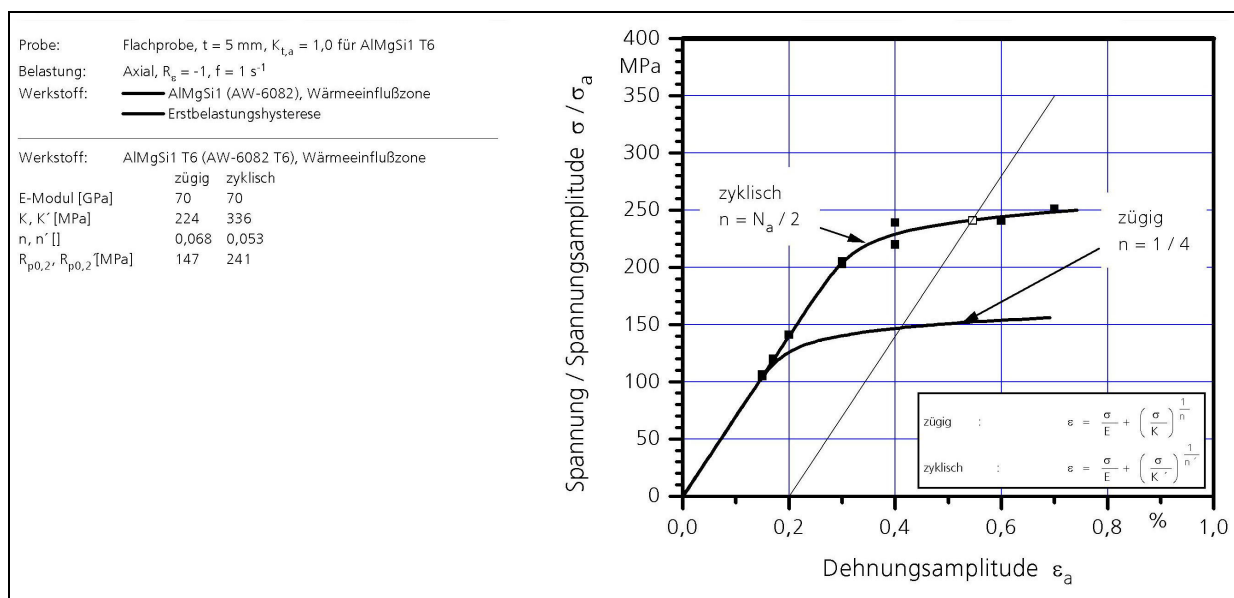


Bild 4.3: Spannungs-Dehnungskurve - Wärmeeinflusszone

So beträgt für den Grundwerkstoff die zügige 0,2 %-Dehngrenze 283 MPa und im zyklisch stabilisierten Werkstoffzustand 317 MPa. Für das Schweißgut ergibt sich bei Erstbelastung eine 0,2 %-Dehngrenze von 133 MPa und im stabilisierten Werkstoffzustand von 223 MPa. Unter zyklischer Belastung liegt beim Grundwerkstoff bis ca. 240 MPa und beim Schweißgut bis ca. 200 MPa linear-elastisches Werkstoffverhalten vor. In den Diagrammen sind jeweils auch die Ergebnisse der naturharten Vergleichslegierung AlMg4,5Mn (AW-5083) eingetragen.

Für jede Probe aus dem Grundwerkstoff, dem Schweißgut und der Wärmeeinflusszone wurden aus der Erstbelastung der Elastizitätsmodul und aus der stabilisierten σ - ε -Hysterese die

Maximalspannung, die dazugehörige Spannungsamplitude und die elastischen und plastischen Dehnungsanteile bestimmt. Neben der Feststellung des Wechselverformungsverhaltens dient die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve der Ermittlung von Kerbgrundbeanspruchungen unter Zugrundelegung der Neuber-Regel oder Modifikationen, sofern diese elastisch-plastisch sind, vgl. Abschnitt 2.3 [Neu68-1, See77, Bes76, Son93, Son84].

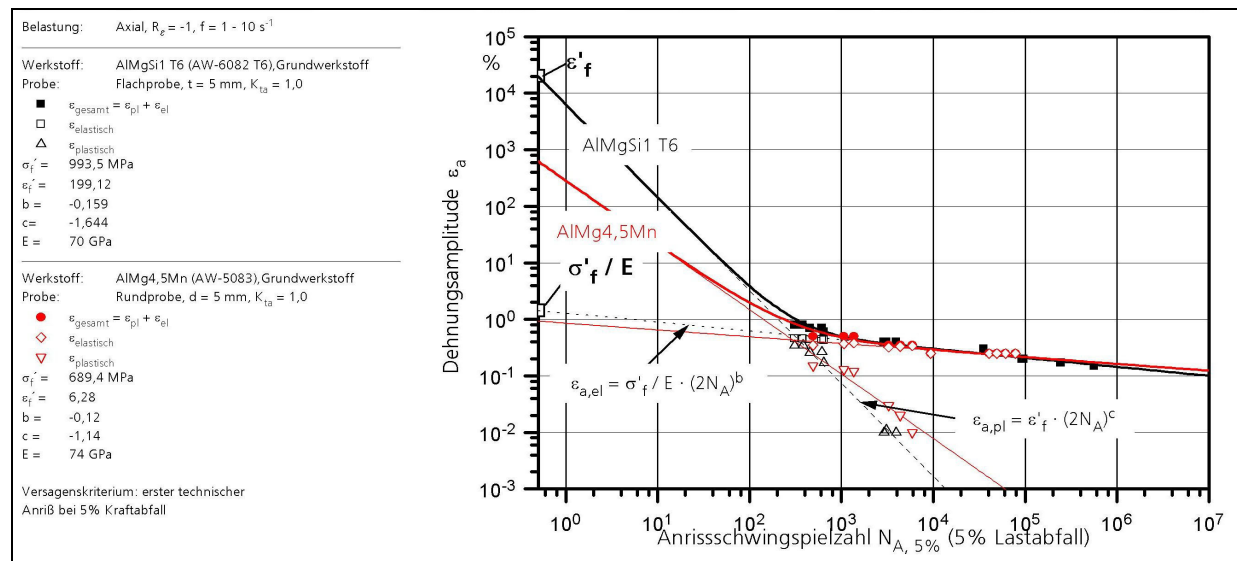


Bild 4.4: Dehnungswöhlerlinie - Grundwerkstoff

Das Schwingfestigkeitsverhalten bei elastisch-plastischer Beanspruchung ist in den Dehnungswöhlerlinien für den Grundwerkstoff, Bild 4.4, das Schweißgut, Bild 4.5 und die Wärmeeinflusszone, Bild 4.6, dargestellt.

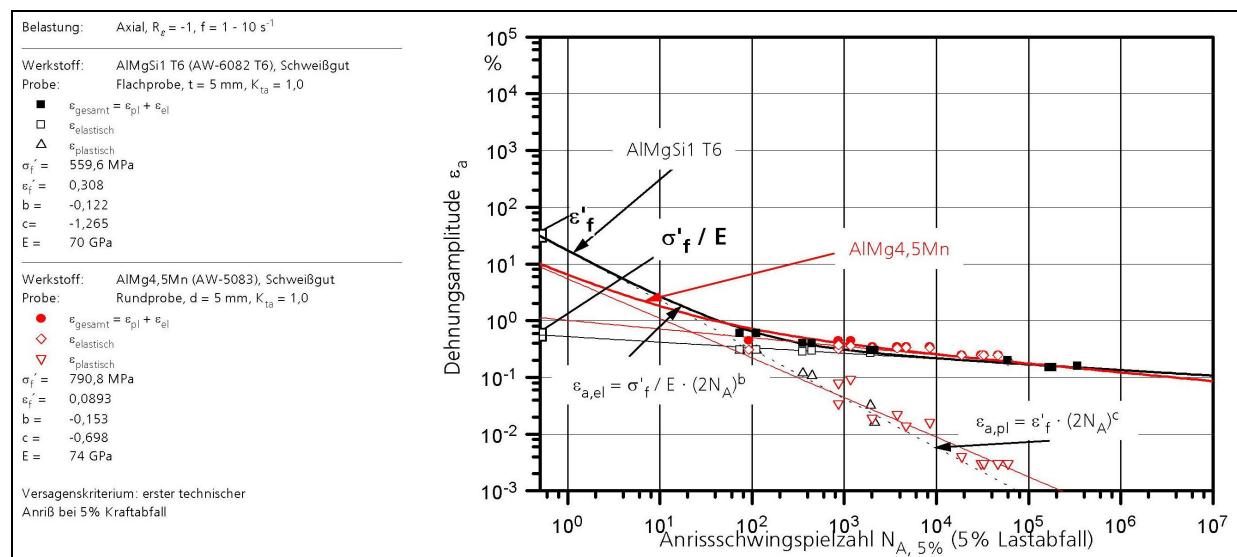


Bild 4.5: Dehnungswöhlerlinie – Schweißgut

In der Dehnungswöhlerlinie sind die Amplituden der Gesamtdehnung sowie die elastischen und plastischen Dehnungsanteile im zyklisch stabilisierten Zustand über der ertragbaren Anrisschwingenspielzahl N_A aufgetragen.

Die Anrisschwingenspielzahl N_A wurde bei einem Abfall der Maximalspannung um 5 % bestimmt, was bei der gewählten Probenform einem ersten technischen Anriß mit einer Tiefe von $a_{tech} = 0,25$ bis 0,5 mm entspricht. Für diese Anrißtiefe wurden auch die Anrißschwingenspielzahlen

der kraftgeregelt durchgeführten Schwingfestigkeitsversuche mit den Basisproben bestimmt, um einen einheitlichen Auswertemaßstab zu erhalten.

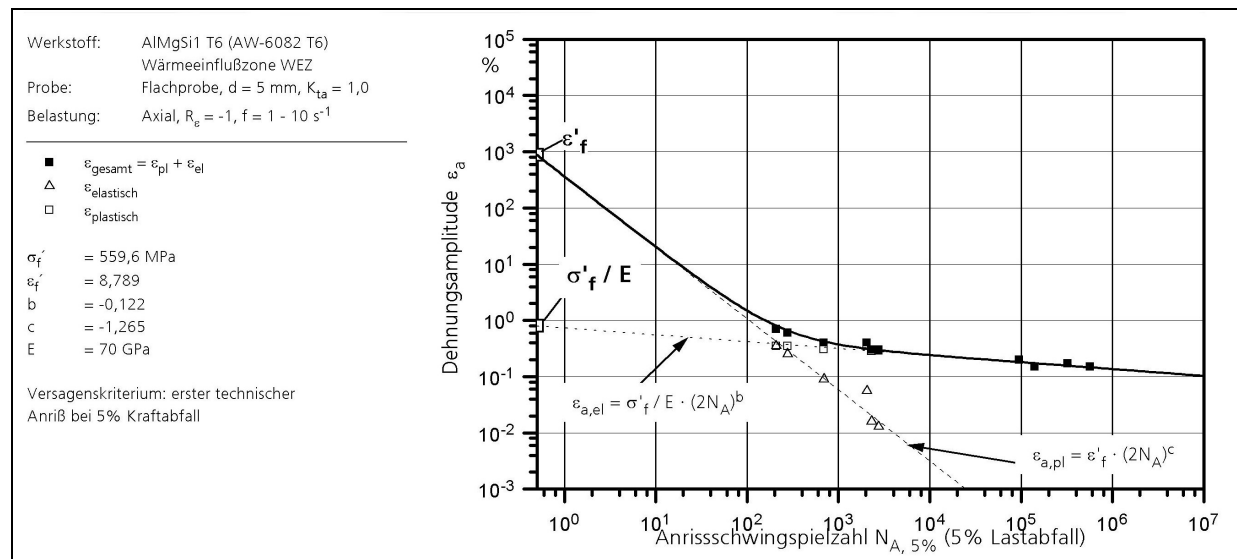


Bild 4.6: Dehnungswöhlerlinie – Wärmeeinflusszone

Die aus den Versuchsergebnissen mit Hilfe der linearen Regression berechneten Konstanten sind in den zugehörigen Diagrammen und in Tabelle 4.1 aufgeführt. Dort findet sich auch eine tabellarische Gegenüberstellung mit den Werten der Legierung AlMg4,5Mn (AW-5083).

		Grundwerkstoff		Schweißgut		Wärmeeinflusszone	
Werkstoff		AlMgSi1 T6	AlMg4,5Mn	AlMgSi1 T6	AlMg4,5Mn	AlMgSi1 T6	AlMg4,5Mn
Elastizitätsmodul	E [MPa]	70	74	70	70	70	-
Zügiger Spannungskoeffizient	K [MPa]	349	388	304	346	224	-
Zügiger Verfestigungsexponent	n	0,033	0,142	0,135	0,158	0,068	-
Zügige 0,2% Dehngrenze	$R_{p0,2}$ [MPa]	283	161	133	129	147	-
Zyklischer Spannungskoeffizient	K' [MPa]	394	392	306	372	335	-
Zyklischer Verfestigungsexponent	n'	0,0351	0,0562	0,0513	0,0523	0,0530	-
Zyklische 0,2% Dehngrenze	$R_{p0,2}'$ [MPa]	317	270	223	269	241	-
Zyklischer Spannungskoeffizient	σ'_f [MPa]	993,5	689,4	393,9	790,8	559,6	-
Zyklischer Spannungsexponent	b	-0,159	-0,12	-0,098	-0,153	-0,122	-
Zyklischer Dehnungskoeffizient	ϵ'_f	199,12	6,28	0,308	0,0893	8,789	-
Zyklischer Dehnungsexponent	c	-1,644	-1,14	-0,866	-0,698	-1,265	-

Tabelle 4.1: Kennwerte des elastisch-plastischen Materialverhaltens

In der Literatur [Ber83] sind für das zyklische Verhalten des gleichen Werkstoffes ähnliche Werte ermittelt worden.

Während der elastische Anteil der zyklischen Dehnungsamplitude für Grundwerkstoff und Schweißgut sich wenig unterscheidet, liegt der plastische Anteil für den Grundwerkstoff deutlich über dem für das Schweißgut, d.h. der Grundwerkstoff ist duktiler. Dies trifft auch auf die Legierung AlMg4,5Mn (AW-5083) zu. Für beide Zustände Grundwerkstoff und Schweißgut liegen die Dehnungswöhlerlinien der Legierung AlMgSi1 T6 (AW-6082 T6) oberhalb der von AlMg4,5Mn

(AW-5083). Für die drei bzw. zwei Werkstoffzustände der beiden Legierungen liegt ab etwa 10^4 Schwingspielen linear-elastisches Verhalten vor. Wie in Abschnitt 2.6 erwähnt, ist es durch die Anwendung von Schadensparametern möglich, den Einfluss von Mittelspannungen und Mitteldehnungen zu berücksichtigen und damit in einem gemeinsamen Diagramm aufzutragen.

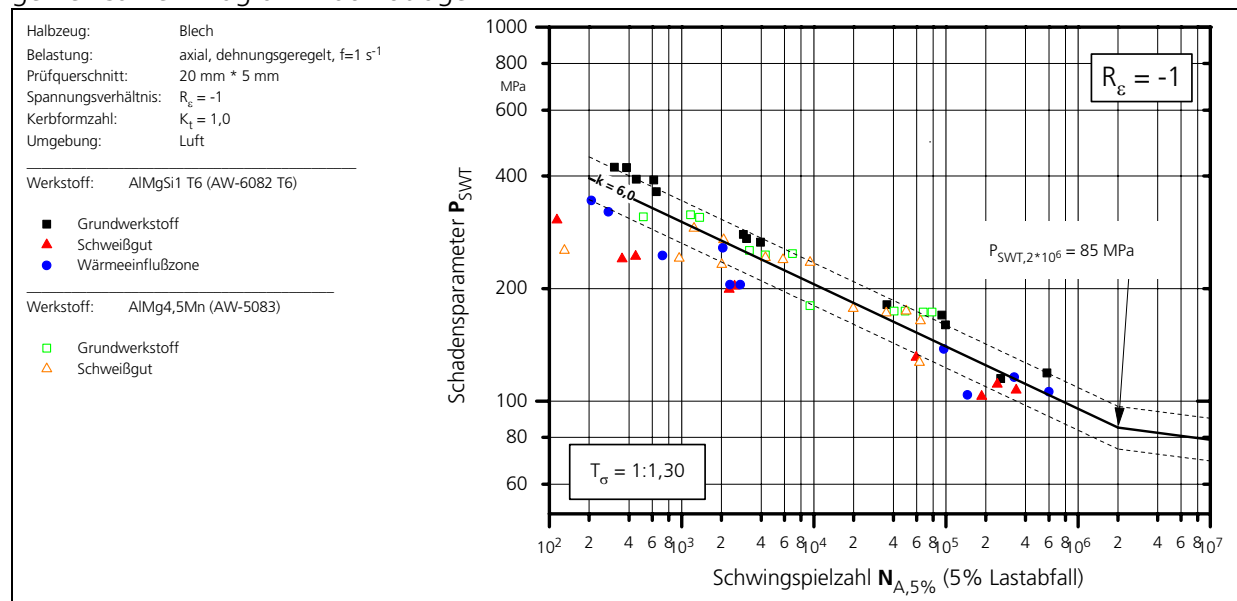


Bild 4.7: P_{SWT} - Darstellung aller Versuche

Für den Schadensparameter nach Smith, Watson und Topper [Smi70] P_{SWT} wurde diese mit den Ergebnissen der dehnungsgeregelten Versuche beider Legierungen durchgeführt, siehe auch Abschnitt 2.6. Die Dehnungsregelung mit konstantem Dehnungsverhältnis R_ϵ führt aufgrund des unterschiedlichen elastisch-plastischen Materialverhaltens je nach vorliegendem Werkstoffzustand und Legierung zu unterschiedlichen Spannungsverhältnissen R_σ .

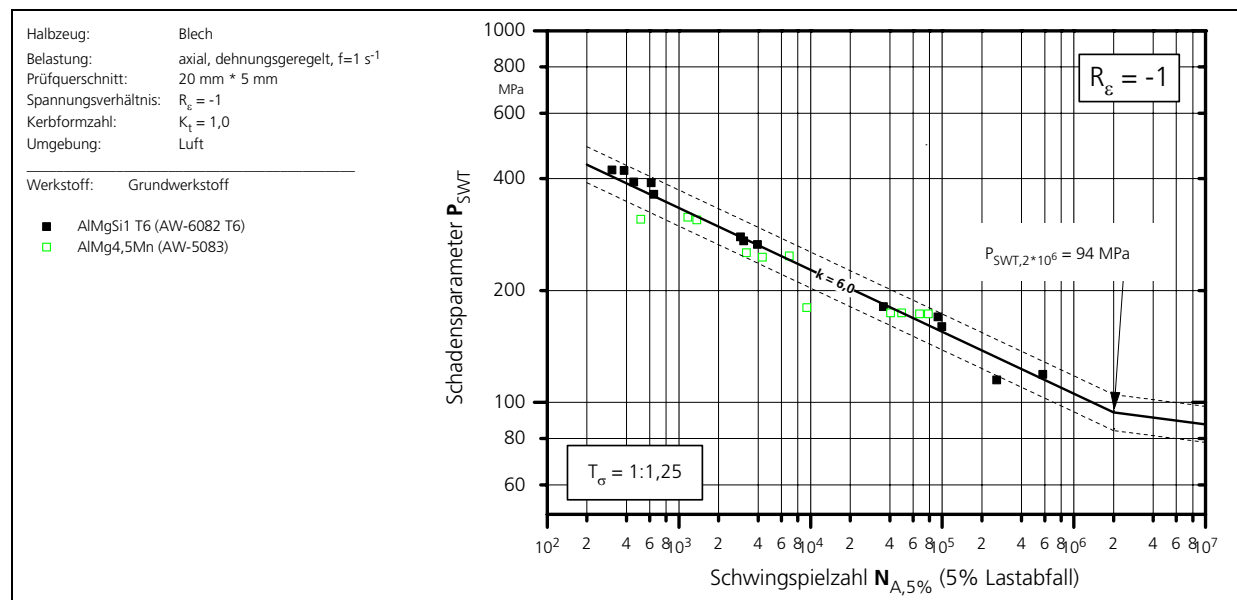


Bild 4.8: P_{SWT} - Darstellung - Grundwerkstoff

Bei der gemeinsamen Auftragung aller Versuchsergebnisse, Bild 4.7, fallen diese in ein schmales Streuband von $T_{PSWT} = 1 : 1,30$. Lediglich im Bereich geringer Schwingungszahlen von $N < 4 \cdot 10^3$ nimmt die Streuung stark zu, weil die Versuchspunkte für das Schweißgut beider Legierungen eine deutlich geringere Schwingfestigkeit aufweisen. Dies zeigt sich auch im flachen Verlauf der Geraden für den plastischen Anteil in der Dehnungswöhlerlinie. Bei der getrennten Auftragung für die Werkstoffzustände Grundwerkstoff, Bild 4.8, und Schweißgut, Bild 4.9, zeigt sich eine konstante Streuung über den gesamten Schwingungszahlenbereich.

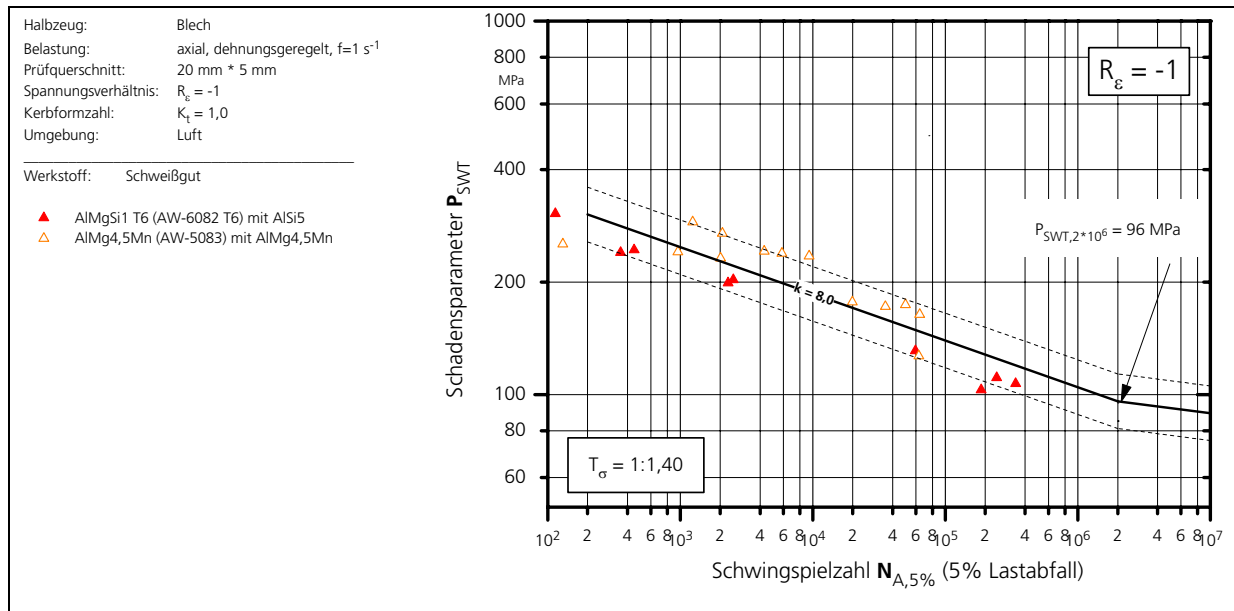


Bild 4.9: P_{SWT} – Darstellung - Schweißgut

Die Ergebnisse der Versuche mit Proben der Wärmeeinflusszone (AlMgSi1 T6) liegen unterhalb der Ergebnisse für die Grundwerkstoffe, Bild 4.10, und im Streuband der Ergebnisse mit Schweißgutproben, Bild 4.11.

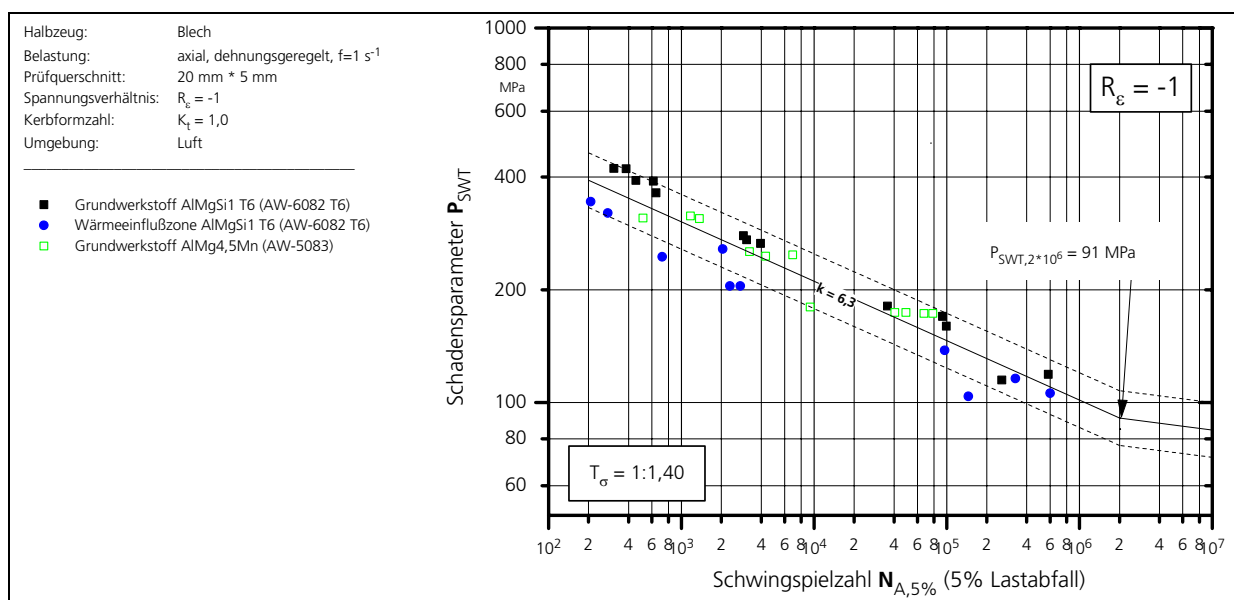


Bild 4.10: P_{SWT} – Darstellung – gemeinsame Auftragung für Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszone

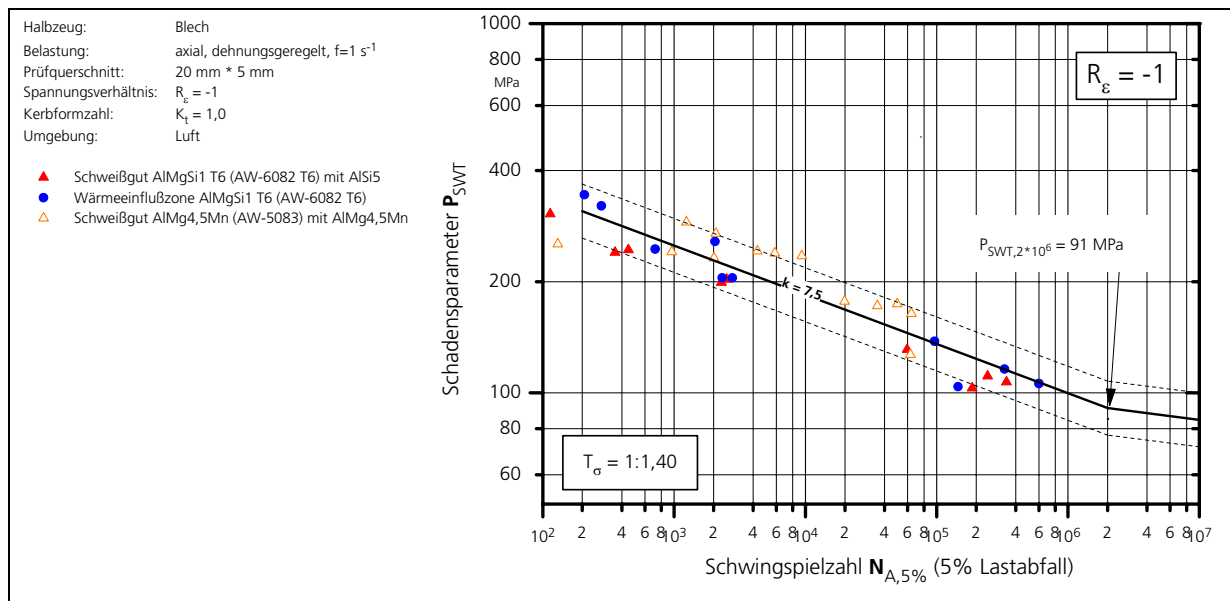


Bild 4.11: P_{SWT} – Darstellung – gemeinsame Auftragung für Schweißgut und Wärmeeinflusszone

4.1.2 Schwingfestigkeit im ungekerbten und gekerbten Zustand unter Lastregelung

Die Ergebnisse aus den lastgesteuerten Schwingfestigkeitsversuchen unter Wechselbeanspruchung ($R_\sigma = -1$) und Schwellbeanspruchung ($R_\sigma = 0$) mit ungekerbten und gekerbten Flachproben sind für den Grundwerkstoff, das Schweißgut und die Wärmeeinflusszone mit den zugehörigen Wöhlerlinien in Bild 4.12 bis Bild 4.17 dargestellt. Als Beanspruchungsparameter ist die Nennspannungsamplitude und als Versagenskriterium sind die Anriss- und Bruchschwingspielzahl aufgetragen.

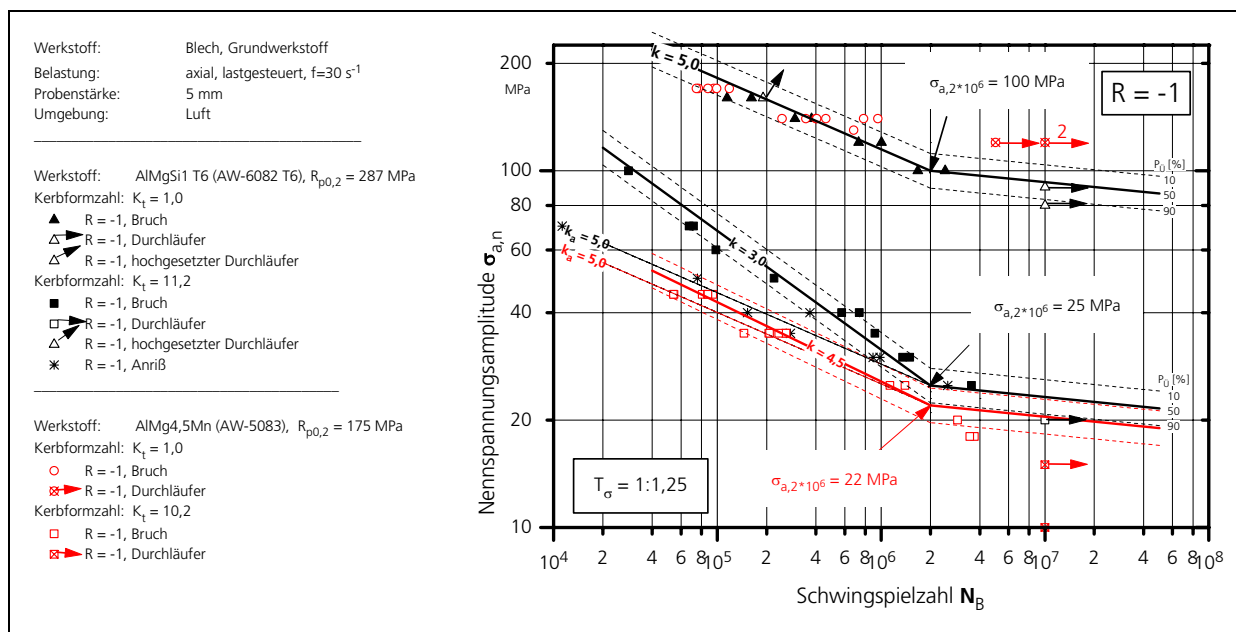


Bild 4.12: Wöhlerlinie Grundwerkstoff – $R = -1$

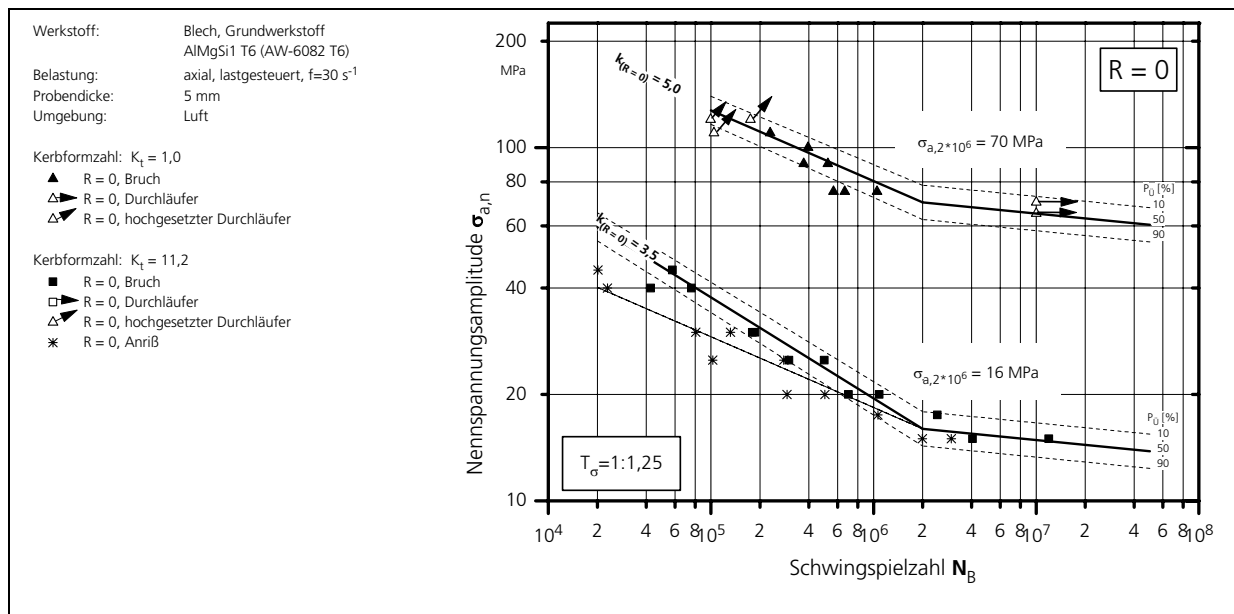


Bild 4.13: Wöhlerlinie Grundwerkstoff – R = 0

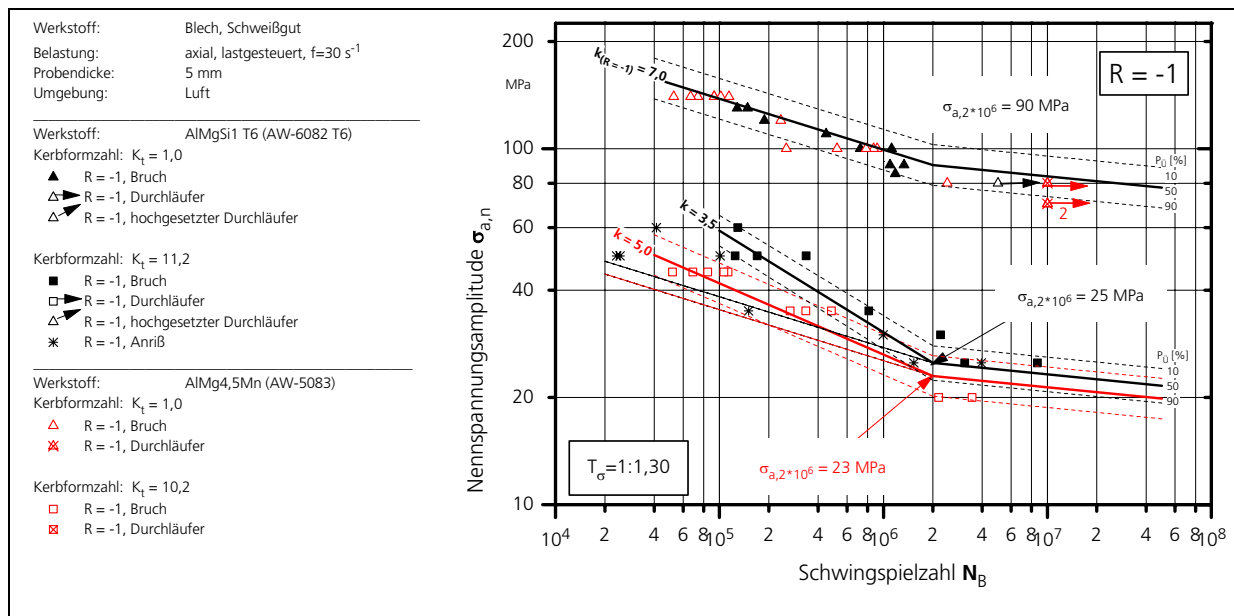


Bild 4.14: Wöhlerlinie Schweißgut – R = -1

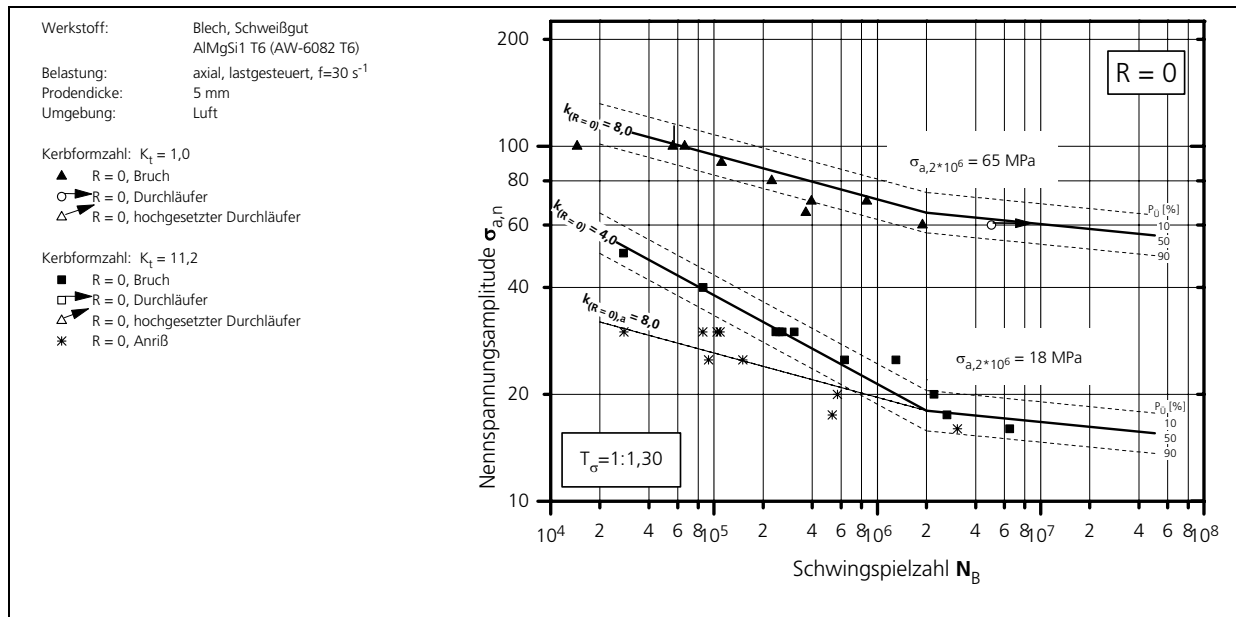


Bild 4.15: Wöhlerlinie Schweißgut – R = 0

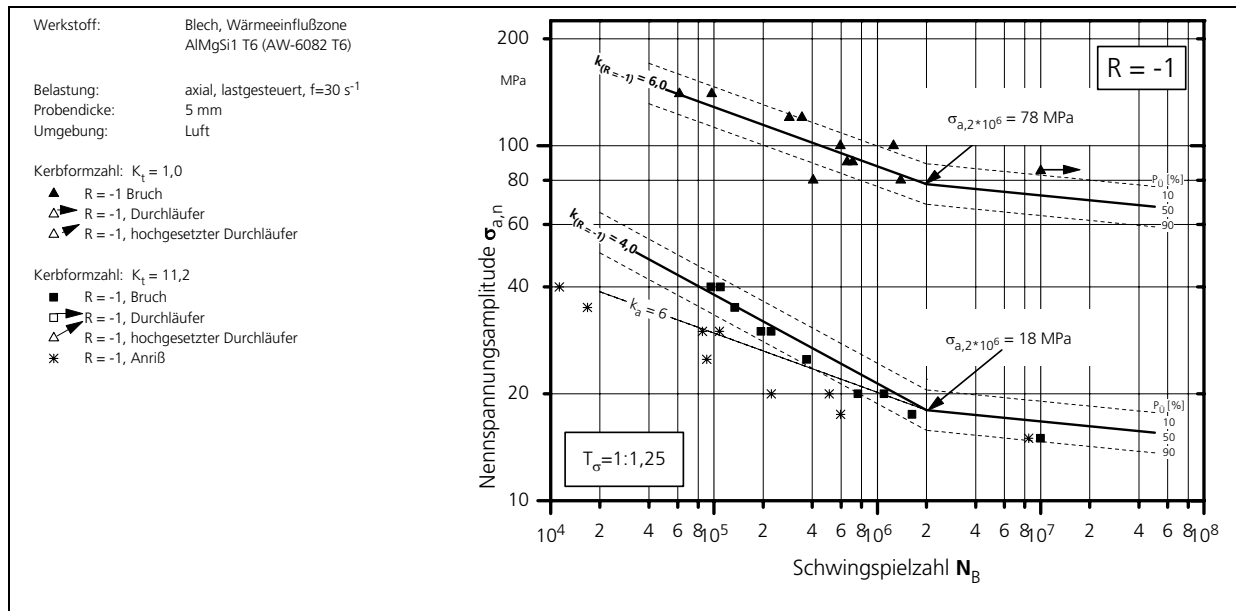


Bild 4.16: Wöhlerlinie Wärmeeinflusszone – R = -1

Werkstoff: Blech, Wärmeeinflusszone
AlMgSi1 T6 (AW-6082 T6)
Belastung: axial, lastgesteuert, $f=30 \text{ s}^{-1}$
Probendicke: 5 mm
Umgebung: Luft

Kerbformzahl: $K_t = 1,0$
▲ R = 0, Bruch
△ R = 0, Durchläufer
△ R = 0, hochgesetzter Durchläufer

Kerbformzahl: $K_t = 11,2$
■ R = 0, Bruch
□ R = 0, Durchläufer
△ R = 0, hochgesetzter Durchläufer
✱ R = 0, Anriß

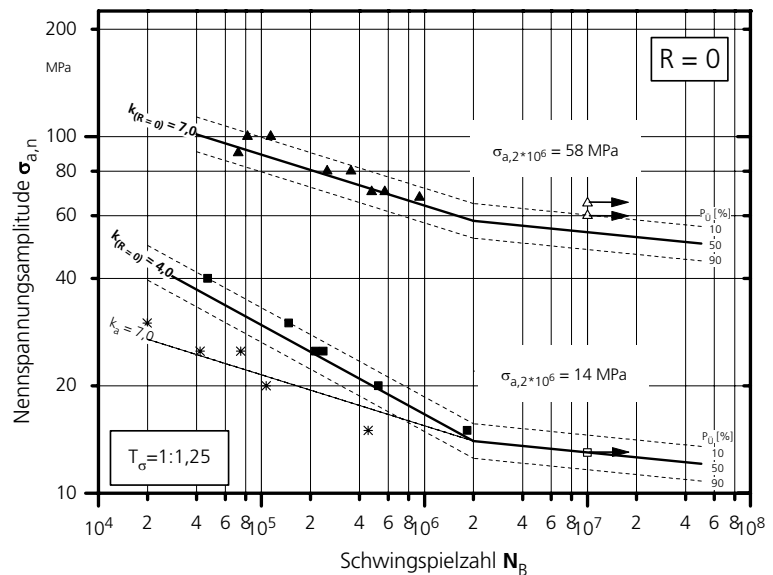


Bild 4.17: Wöhlerlinie Wärmeeinflusszone – R = 0

Mit zunehmender Kerbwirkung wird der Verlauf der Bruchwöhlerlinie steiler, so dass der Neigungsexponent $k_{50\%}$ [Hai89]

$$k_{50\%} = \frac{\Delta \lg N}{\Delta \lg \sigma_a}$$

Gl. 4.1

abnimmt.

Der Abknickpunkt der Wöhlerlinien wurde einheitlich auf $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspiele festgelegt. Auch nach dem Abknickpunkt ist mit einem weiteren Abfall der Schwingfestigkeit zu rechnen, der jedoch geringer als im Zeitfestigkeitsbereich ist. Eine ausgeprägte Dauerfestigkeit, wie sie früher angenommen wurde, existiert weder für Stahl noch für Aluminium [Son05].

Für Aluminium muss aus Erfahrungen mit einem Abfall der Schwingfestigkeit von 10 % pro Dekade nach dem Abknickpunkt gerechnet werden. Die Versuche wurden deshalb bis zu einer Grenzschiwingspielzahl von 10^7 Schwingspielen durchgeführt, wobei die nicht gebrochenen Proben als Durchläufer bezeichnet werden. Diese sind durch ein offenes Symbol markiert, und die nebenstehende Zahl gibt die Anzahl der Durchläufer an. Diese Proben wurden teilweise in einem neuen Versuch auf einem höheren Horizont ein zweites Mal beansprucht (sog. hochgesetzte Durchläufer).

Die ermittelten Anrisschiwingspielzahlen beziehen sich auf eine Risstiefe von ca. 0,25 bis 0,5 mm. Der relative Anteil der Rissfortschrittslebensdauer, d.h. die Differenz von Anriss- und Bruchschwiwingspielzahl, nimmt mit abnehmender Lebensdauer und steigender Formzahl zu. Für die ungekerbten Proben mit 5 mm Dicke wurde deshalb für Anriss- und Bruchwöhlerlinie die gleiche Neigung unterstellt.

Als Streuband ($N = \text{konst.}$) [Hai89, Bux92]

$$T_{\sigma_a} = 1 : \frac{\sigma_a(P_{\dot{U}} = 10\%)}{\sigma_a(P_{\dot{U}} = 90\%)}$$

Gl. 4.2

wurde den Wöhlerlinien des Grundwerkstoffes und der Wärmeeinflusszone ein einheitliches Streuband von 1 : 1,25 unterstellt. Für das Schweißgut wurde 1 : 1,30 angenommen. Die Annahme von einheitlichen Streumaßen lehnt sich an das Konzept der normierten Wöhlerlinien an [Hai02] und stützt sich auf Erfahrungswerte mit Aluminiumlegierungen [Schü68].

Für den Fall der ungekerbten Proben fallen die Ergebnisse der warmausgehärteten Legierung AlMgSi1 T6 (AW-6082 T6) und der naturharten Vergleichslegierung AlMg4,5Mn (AW-5083) für die Werkstoffzustände Grundwerkstoff und Schweißgut für das Spannungsverhältnis $R = -1$ in ein Streuband. Die Anrisswöhlerlinien für ungekerbte und scharf gekerbte Proben weisen denselben Neigungsexponenten auf. Die Unterschiede in der Schwingfestigkeit der beiden Legierungen für die rissartig gekerbten Proben können mit der unterschiedlichen Dehngrenze $R_{p0,2}$ erklärt werden. Während die örtliche Spannung am Abknickpunkt der Wöhlerlinie in der Kerbe bei der Legierung AlMgSi1 T6 noch im elastischen Bereich liegt, ist dies bei der Legierung AlMg4,5Mn wegen der geringeren Dehngrenze von $R_{p0,2} = 175 \text{ MPa}$ nicht mehr der Fall. Dort findet bereits eine lokale Plastifizierung, auch auf diesem geringen Nennspannungsniveau, statt. Im Vergleich zum Grundwerkstoff verlaufen die Wöhlerlinien der beiden Schweißgute im Zeitfestigkeitsbereich steiler.

In Tabelle 4.2 sind die Neigungsexponenten der mittleren Wöhlerlinie (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_u = 50\%$) und die ermittelten Schwingfestigkeitswerte am Abknickpunkt der Wöhlerlinie für Grundwerkstoff, Schweißgut und Wärmeeinflusszone zusammengefasst und den Kennwerten der Vergleichslegierung gegenübergestellt.

		Probe	Grundwerkstoff (GW)				Schweißgut (SG)				Wärmeeinflußzone (WEZ)			
			N _K	σ _{K,nenn} [MPa]	σ _{a,5Mio} [MPa]	k _{50%,Bruch} k* _{50%,Anriß}	N _K	σ _{K,nenn} [MPa]	σ _{a,5Mio} [MPa]	k _{50%,Bruch} k* _{50%,Anriß}	N _K	σ _{K,nenn} [MPa]	σ _{a,5Mio} [MPa]	k _{50%,Bruch} k* _{50%,Anriß}
AlMgSi1 T6	R = -1	K _t = 1,0	2*10 ⁶	100	95	5,0 5,0	2*10 ⁶	90	86	7,0 7,0	2*10 ⁶	78	75	6,0 6,0
		K _t = 11,2	2*10 ⁶	25	24	3,0 5,0	2*10 ⁶	25	24	3,5 7,0	2*10 ⁶	18	17	4,0 6,0
	R = 0	K _t = 1,0	2*10 ⁶	70	67	5,0 5,0	2*10 ⁶	65	63	8,0 8,0	2*10 ⁶	58	56	7,0 7,0
		K _t = 11,2	2*10 ⁶	16	15	3,5 5,0	2*10 ⁶	18	17	4,0 8,0	2*10 ⁶	14	13	4,0 7,0
AlMg4,5Mn	R = -1	K _t = 1,0	2*10 ⁶	100	95	5,0 5,0	2*10 ⁶	90	86	7,0 7,0	-	-	-	-
		K _t = 10,2	2*10 ⁶	23	22	3,0 5,0	2*10 ⁶	23	22	3,5 7,0	-	-	-	-
			Mittelspannungsempfindlichkeit M bei N = 5*10 ⁶											
AlMgSi1 T6	K _t = 1,0	0,42				0,36				0,34				
	K _t = 11,2	0,60				0,41				0,31				
Überlebenswahrscheinlichkeit: P ₀ = 50%														
Belastung: axial, lastgesteuert														

Tabelle 4.2: Kennwerte der Wöhlerlinien der Basisproben

Die Unterschiede des Schwingfestigkeitsverhaltens sind darin begründet, dass beim Grundwerkstoff ein homogenes, gerichtetes Gefüge infolge des Walzens vorliegt, während das Schweißgut aufgrund des Aufschmelzens ein gussähnliches Gefüge mit Poren aufweist, siehe Abschnitt 3.1.3.

Die Mittelspannungsempfindlichkeiten M

$$M = \frac{\sigma_a(R = -1)}{\sigma_a(R = 0)} - 1 \quad \text{Gl. 4.3}$$

bei $5 \cdot 10^6$ Schwingspielen liegen für alle drei Gefügezustände und beide Kerbvarianten zwischen $M = 0,31$ und $M = 0,41$. Dies entspricht auch in der Literatur gängigen Angaben z.B. [Hai75, Rad95, Son02, Son04].

4.1.3 Berechnung der Ersatzstrukturlänge

Um die Ersatzstrukturlänge, wie in Abschnitt 2.3.3 erläutert, zu bestimmen, wurden zunächst die Kerbwirkungszahlen K_f (Gl. 2.14) aus den Schwingfestigkeitsergebnissen von Grundwerkstoff, Schweißgut und Wärmeeinflusszone für $R = -1$, Bild 4.18, und $R = 0$, Bild 4.19, abgeleitet. Bei der Berechnung wurden die Neigungen und Abknickpunkte der Anrisswöhlerlinien zugrunde gelegt. Es ergeben sich wegen desselben Neigungsexponenten von ungekerbten und scharf gekerbten Proben konstante Verläufe von K_f über der Anrisschwingspielzahl N_A .

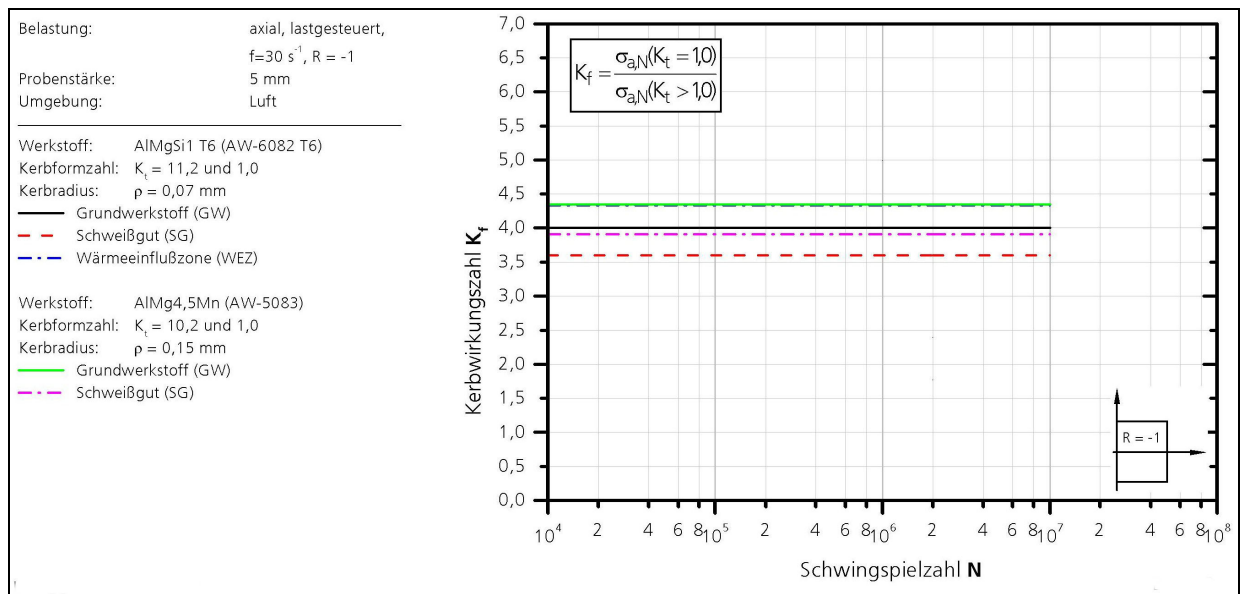


Bild 4.18: Kerbwirkungszahl für $R = -1$

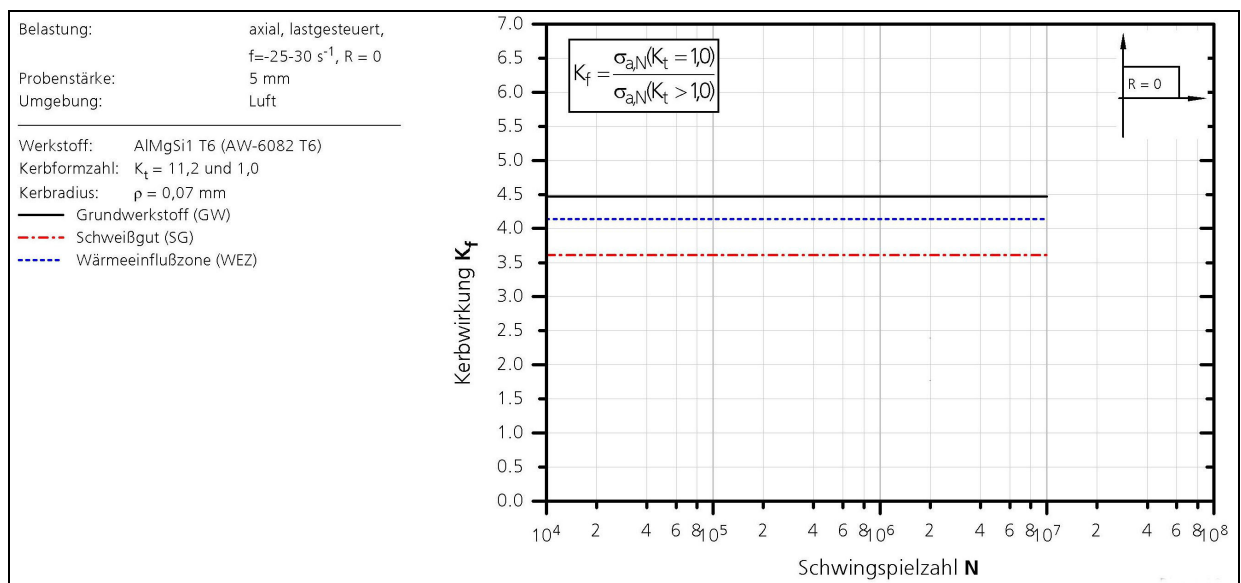


Bild 4.19: Kerbwirkungszahl für $R = 0$

Für beide Legierungen und die verschiedenen Werkstoffzustände sind die ermittelten Ersatzstrukturlängen ρ^* nach Radaj (Gl. 2.20 in Abschnitt 2.3.4) in Diagrammen für $R = -1$, Bild 4.20, und $R = 0$, Bild 4.21, in Abhängigkeit von der Anrißschwingungszahl N_A aufgetragen.

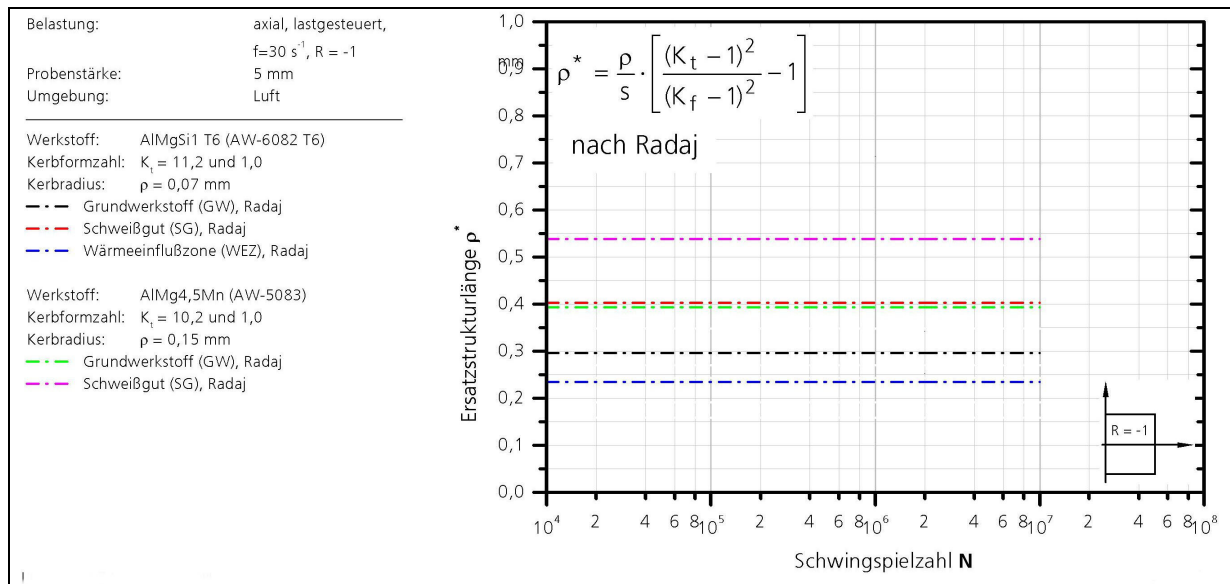


Bild 4.20: Ersatzstrukturlänge nach Radaj für $R = -1$

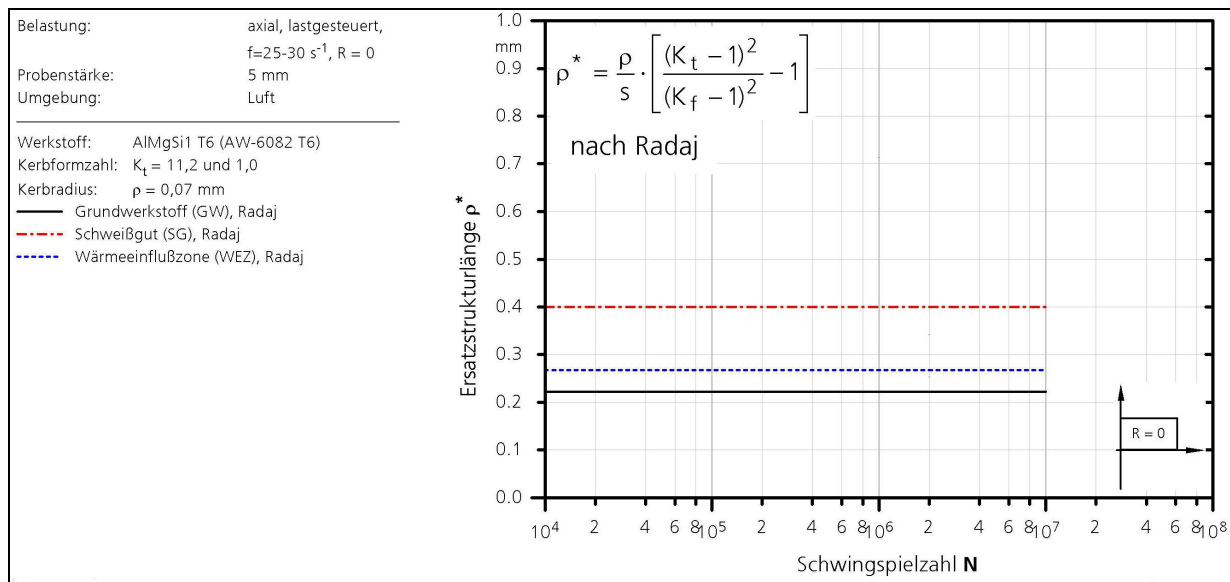


Bild 4.21: Ersatzstrukturlänge nach Radaj für $R = 0$

Die einzelnen Werte der Ersatzstrukturlänge ρ^* sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

		AlMgSi1 T6				AlMg4,5Mn			
					Radaj				Radaj
		ρ [mm]	K _t	K _f	ρ* _{Radaj} [mm]	ρ [mm]	K _t	K _f	ρ* _{Radaj} [mm]
					ρ _{t,Radaj} [mm]				ρ _{t,Radaj} [mm]
R = -1	Grundwerkstoff	0,07	11,2	4,00	0,30	0,15	10,2	4,35	0,39
					0,75				0,98
	Wärmeeinflußzone	0,07	11,2	4,33	0,23	-	-	-	-
					0,58				-
	Schweißgut	0,07	11,2	3,60	0,40	0,15	10,2	3,91	0,54
					1,00				1,35
R = 0	Grundwerkstoff	0,07	11,2	4,47	0,21	-	-	-	-
					0,53				-
	Wärmeeinflußzone	0,07	11,2	4,14	0,27	-	-	-	-
					0,68				-
	Schweißgut	0,07	11,2	3,61	0,40	-	-	-	-
					1,00				-

Die Auswertungen zur Bestimmung der Ersatzstrukturlänge ρ^* zeigen bereits an diesem Punkt, daß die Anwendung des Konzeptes der Mikrostützwirkung einen hohen Aufwand zur Ermittlung der Konstanten für jede Legierung und jeden relevanten Gefügezustand erfordert. Eine Legierungs- und Gefügeunabhängigkeit ist beim Konzept der Mikrostützwirkung nicht gegeben.

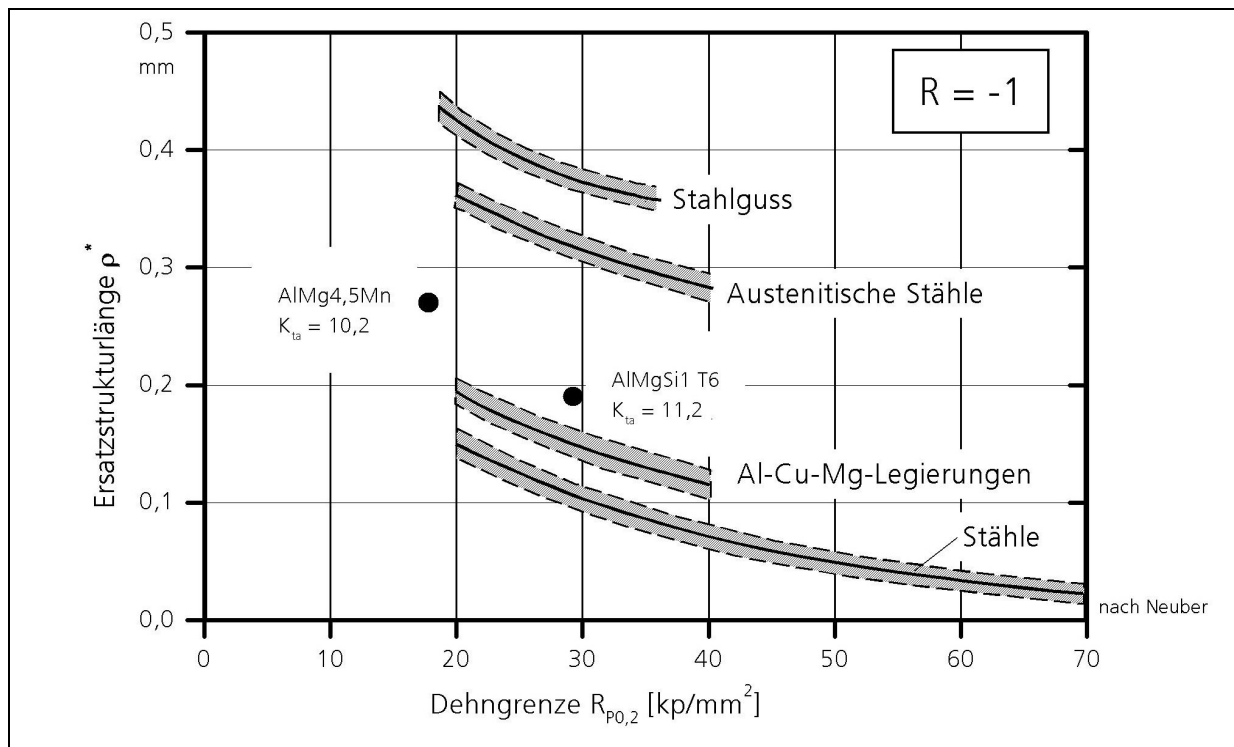


Bild 4.22: Ersatzstrukturlänge verschiedener Werkstoffe in Abh. von $R_{p0,2}$

4.2 Rissfortschrittsverhalten – Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte

Für die Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte, die zur umfassenden Werkstoffcharakterisierung dient, jedoch für ein Berechnungskonzept hier nicht verwendet werden, wurden die Rissfortschrittskurven der scharf gekerbten Proben des Grundwerkstoffes, des Schweißgutes und der Wärmeeinflusszone herangezogen (siehe Anhang Bilder).

Der in Gl. 2.24 (Abschnitt 2.5) angegebene Faktor F berücksichtigt die Geometrie des Risses in Abhängigkeit von der Probenform, der Belastungsart und der Risslänge. Die scharf gekerbten Flachproben ($K_{ta} = 11,2$ bzw. $10,2$) wurden als Probe mit Mittenriss betrachtet, da sich das Risswachstum über die Gesamtlebensdauer vollzog. Für die Probe mit Mittenriss unter Zugbeanspruchung gilt [Tad85]:

$$F = \sqrt{\frac{1}{\cos\left(\pi \frac{a}{W}\right)}} \quad \text{Gl. 4.4}$$

mit W als risspezifischer Geometriefaktor (a : halbe Probenbreite).

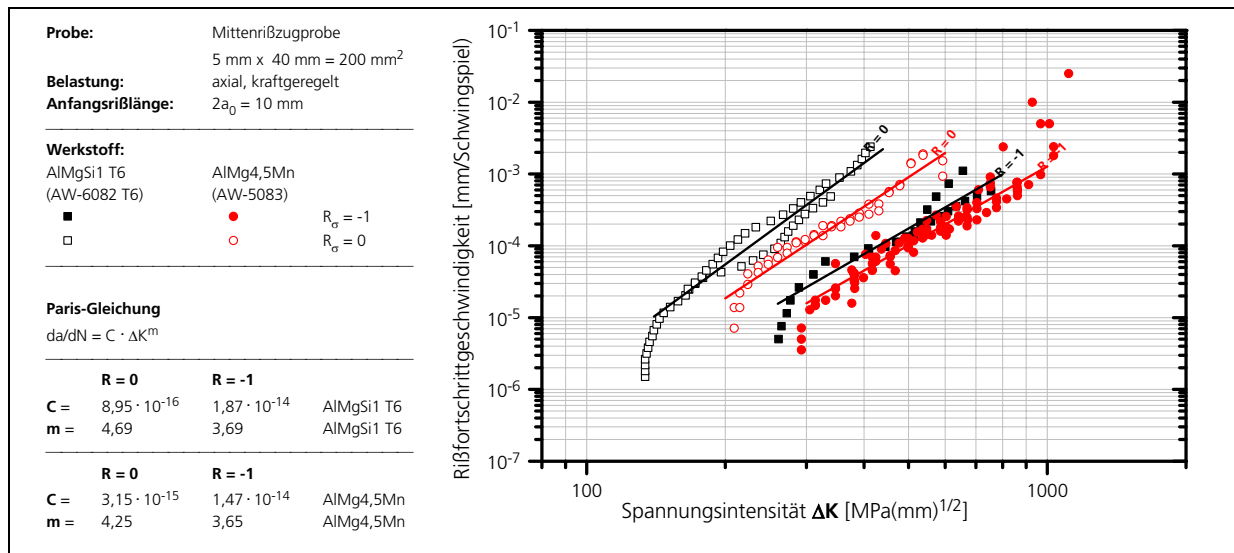


Bild 4.23: Paris-Gerade für Grundwerkstoff

In Bild 4.23 bis Bild 4.25 ist jeweils für Grundwerkstoff, Schweißgut und Wärmeeinflusszone die Rissfortschrittsgeschwindigkeit da/dN über der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK aufgetragen. Entsprechend Gl. 2.21 wurde für die Berechnung der Spannungsintensität die Gesamtschwingbreite der Spannung ($\Delta\sigma = 2\sigma_a$) eingesetzt.

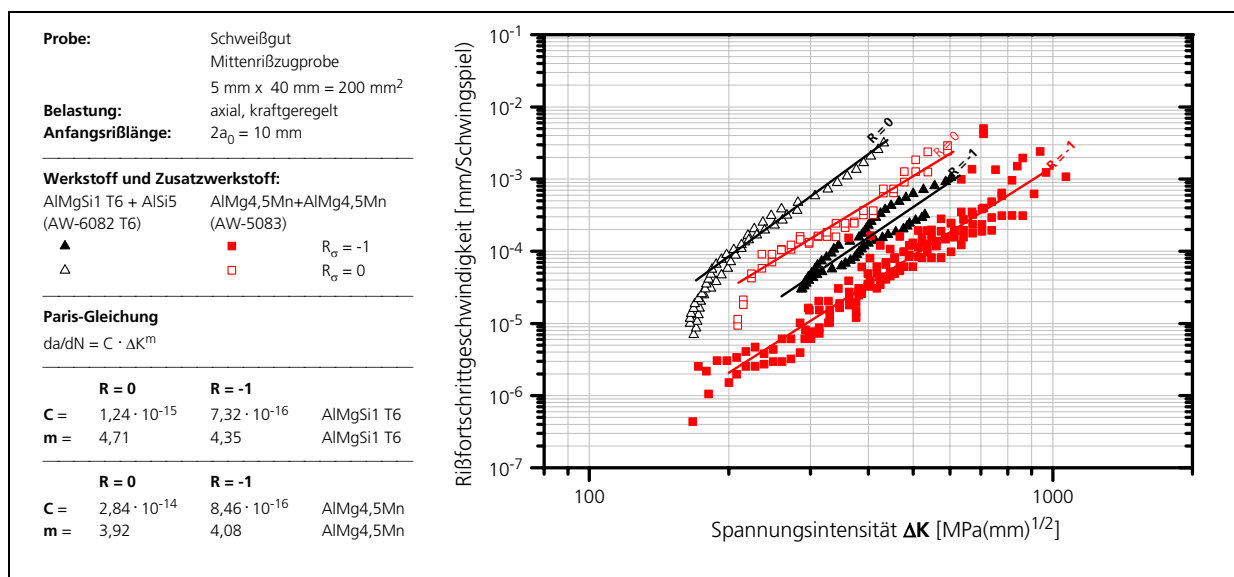


Bild 4.24: Paris-Gerade für Schweißgut

Die Konstanten C und m wurden durch lineare Regression ermittelt und sind in den jeweiligen Diagrammen und in Tabelle 4.4 angegeben. Die Werkstoffzustände Grundwerkstoff und Schweißgut der jeweiligen Legierung AlMgSi1 T6 (AW-6082 T6) und AlMg4,5Mn (AW-5083) fallen in ein Streuband und unterscheiden sich insofern nicht wesentlich. Jedoch gibt es Unterschiede bei den Legierungen. Bei der Legierung AlMgSi1 T6 (AW-6082 T6) findet ein schnelleres Risswachstum statt.

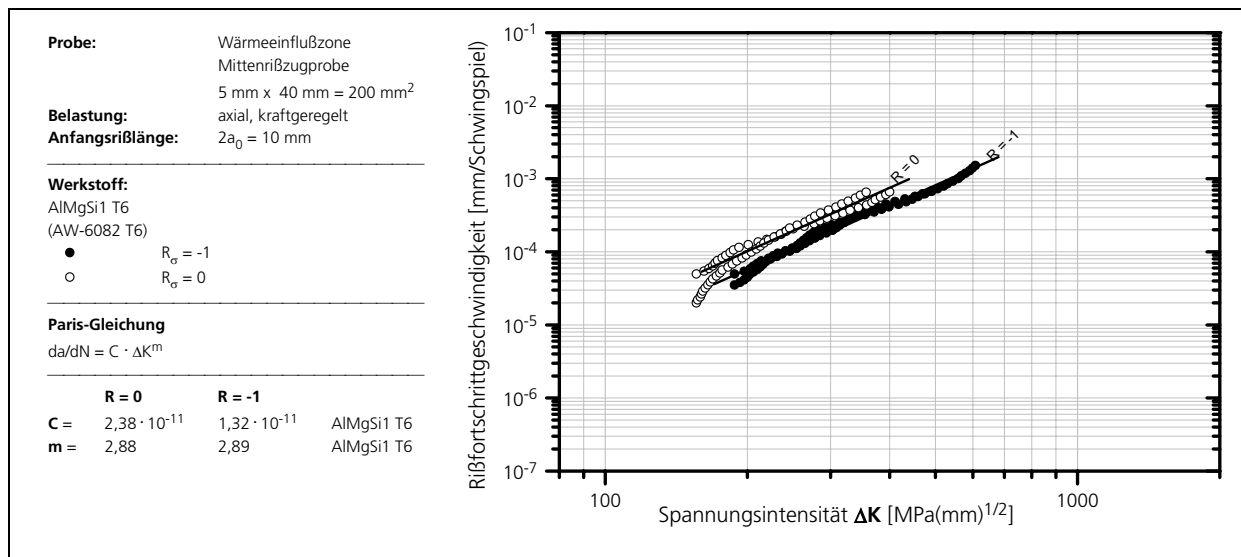


Bild 4.25: Paris-Gerade für Wärmeeinflusszone

		AlMgSi1 T6				AlMg4,5Mn			
		m []	C []	ΔK ₀ [MPa(mm) ^{1/2}]	ΔK _c [MPa(mm) ^{1/2}]	m []	C []	ΔK ₀ [MPa(mm) ^{1/2}]	ΔK _c [MPa(mm) ^{1/2}]
R = -1	Grundwerkstoff	3,69	1,87*10 ⁻¹⁴	250 ¹⁾	1000 ¹⁾	3,65	1,47*10 ⁻¹⁴	280 ¹⁾	1100 ¹⁾
	Wärmeeinflusszone	2,89	1,32*10 ⁻¹¹	140 ¹⁾	800 ¹⁾	-	-	-	-
	Schweißgut	4,35	7,32*10 ⁻¹⁶	250 ¹⁾	850 ¹⁾	4,08	8,46*10 ⁻¹⁶	150 ¹⁾	1300 ¹⁾
R = 0	Grundwerkstoff	4,69	8,95*10 ⁻¹⁶	130 ¹⁾	500 ¹⁾	4,25	3,15*10 ⁻¹⁵	200 ¹⁾	750 ¹⁾
	Wärmeeinflusszone	2,88	2,38*10 ⁻¹¹	170 ¹⁾	550 ¹⁾	-	-	-	-
	Schweißgut	4,71	1,24*10 ⁻¹⁵	155 ¹⁾	550 ¹⁾	3,92	2,84*10 ⁻¹⁴	200 ¹⁾	

¹⁾ Kennwerte abgeschätzt

Tabelle 4.4: Bruchmechanische Kennwerte

Zur Bestimmung des Einflusses des Spannungsverhältnisses bzw. der Mittelspannung auf das Risswachstumsverhalten wurden mit den rissartig gekerbten Flachproben neben den Schwingfestigkeitsversuchen unter Wechselbeanspruchung (R_σ = -1) auch Versuche unter Schwellbeanspruchung (R_σ = 0) durchgeführt. Wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, bewirkt eine Erhöhung des Spannungsverhältnisses R, d.h. der Mittelspannungen, eine Verschiebung der Paris-Geraden zu niedrigeren Spannungsintensitäten, Bild 4.23 bis Bild 4.25.

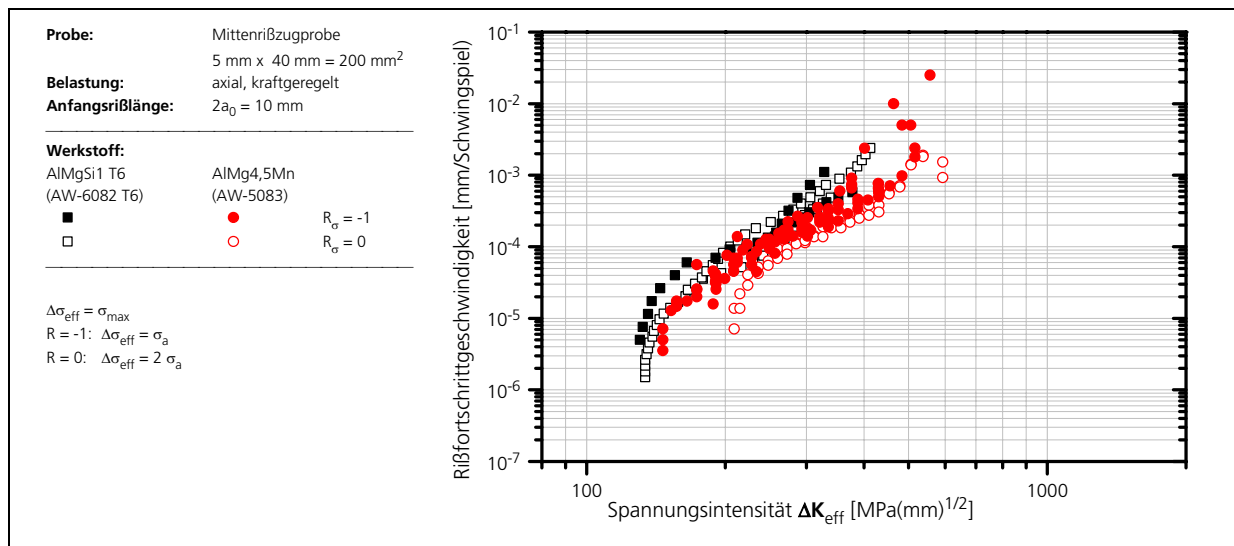


Bild 4.26: Effektive Spannungsintensität ΔK_{eff} nach Forman - Grundwerkstoff

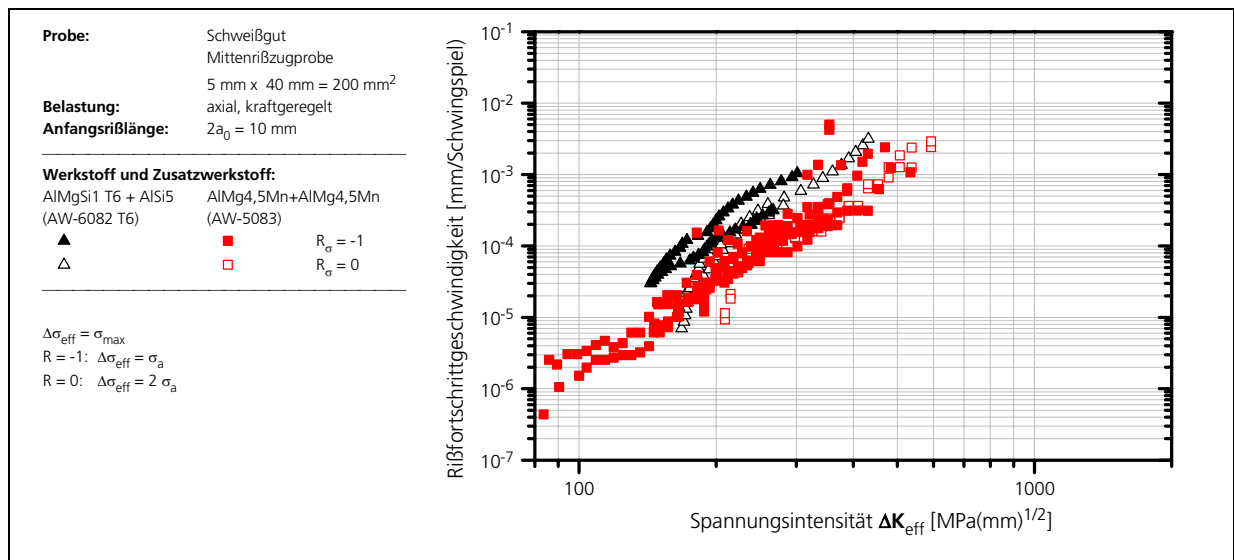


Bild 4.27: Effektive Spannungsintensität ΔK_{eff} nach Forman - Schweißgut

Rissschließeffekte wurden unter der Annahme, dass sich der Riss im Druckbereich schließt, und nur die Zugspannungen zum Rissfortschritt beitragen, berücksichtigt. Die so genannte effektive Spannungsschwingbreite beträgt demzufolge

$$\Delta\sigma_{\text{eff}} = \sigma_a \quad \text{für } R = -1$$

Gl. 4.5

und

$$\Delta\sigma_{\text{eff}} = 2 \cdot \sigma_a \quad \text{für } R = 0$$

Gl. 4.6

Die auf diese Weise berechneten effektiven Spannungsintensitäten sind in Bild 4.26 bis Bild 4.28 eingetragen. Mit dieser einfachen Näherung kann das Rissschließverhalten relativ gut beschrieben werden. Die Versuchspunkte beider Legierungen für Wechsel- und Schwellbeanspruchung fallen in ein gemeinsames Streuband.

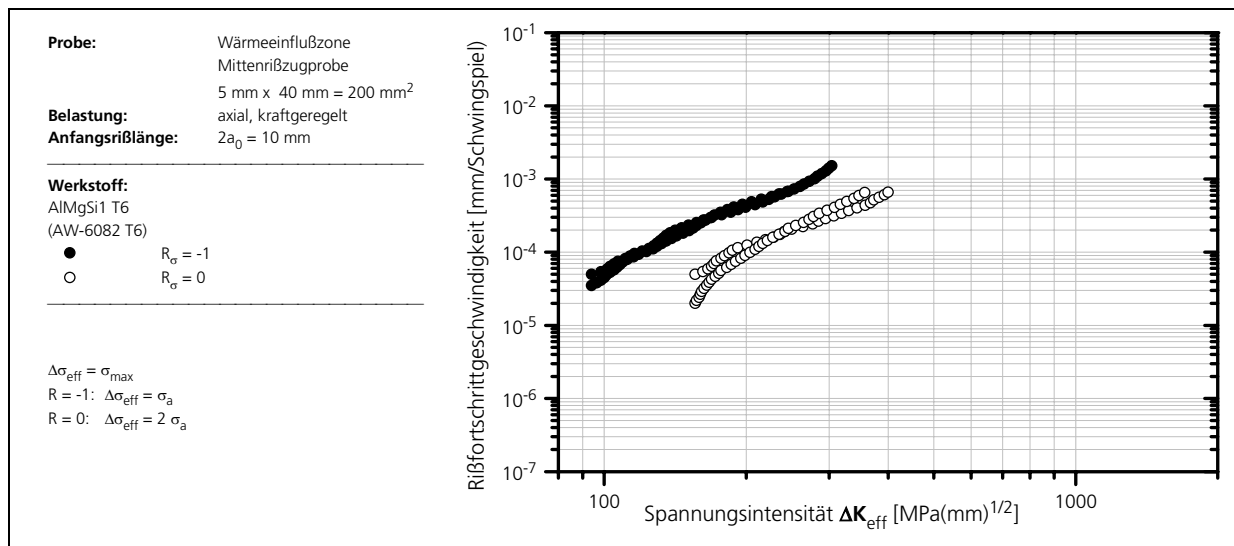


Bild 4.28: Effektive Spannungsintensität ΔK_{eff} nach Forman – Wärmeeinflusszone

4.3 Schwingfestigkeitsverhalten von Schweißverbindungen unter Laststeuerung

Es wurden Stumpfstoße mit und ohne Wurzelspalt und Quersteifen mit einer Materialstärke von 5 mm in axial lastgesteuerten Schwingfestigkeitsversuchen unter schwellender ($R = 0$) und wechselnder ($R = -1$) Beanspruchung untersucht. Der Anriß wurde bei den Schweißproben mit Wurzelspalt entsprechend der hohen Spannungskonzentration am Wurzelspalt initiiert. Bei den Schweißproben ohne Wurzelspalt ging der Riss von der Nahtübergangskerbe aus.

Die Einzelergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche für die Schweißverbindungen der Legierung AlMgSi1 T6 (AW-6082) finden sich im Anhang Tabellen. Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche sind im Nennspannungssystem mit dem Versagenskriterium Bruch getrennt für wechselnde ($R = -1$) und schwellende ($R = 0$) Beanspruchung in Wöhlerdiagrammen aufgetragen. Dabei wurden zusätzlich auch die Ergebnisse mit der naturharten Legierung AlMg4,5Mn (AW-5083) mit $t = 5$ und 25 mm [Wer01], sowie Ergebnisse mit einseitig geschweißten Stumpfstoßen aus den Legierungen AlMgSi0,7 T6 (AW-6005A) und AlMg4,5Mn0,7 (AW-5083) aus einer weiteren Untersuchung [Son02] eingetragen.

Schweißverfahren:	MIG
Belastung:	axial, lastgesteuert, $f=25\text{-}30\text{ s}^{-1}$
Umgebung:	Luft
Dicke t:	5 mm

Werkstoff:	AlMg4,5Mn (AW-5083)
● ○	Stumpfstoß ohne Wurzelspalt
● ○	Stumpfstoß mit Wurzelspalt

Werkstoff:	AlMgSi1 T6 (AW-6082 T6)
◆ ◇	Stumpfstoß ohne Wurzelspalt
◆ ◇	Stumpfstoß mit Wurzelspalt
▼ ▽	Quersteife

Werkstoff:	AlMg4,5Mn0,7 (AW-5083), Charge B
■ □	Stumpfstoß ohne Wurzelspalt
■ □	Stumpfstoß mit Wurzelspalt
■ □	Einseitige Schweißung

Werkstoff:	AlMgSi0,7 T6 (AW-6005A)
● ○	Stumpfstoß ohne Wurzelspalt
● ○	Stumpfstoß mit Wurzelspalt

Werkstoff:	AlMg4,5Mn (AW-5083)
Dicke t:	25 mm
● ○	Stumpfstoß ohne Wurzelspalt
● ○	Stumpfstoß mit Wurzelspalt

Bruch (volles Symbol)	
Durchläufer (offenes Symbol)	
hochgesetzter Durchläufer (Symbol mit Kreuz)	

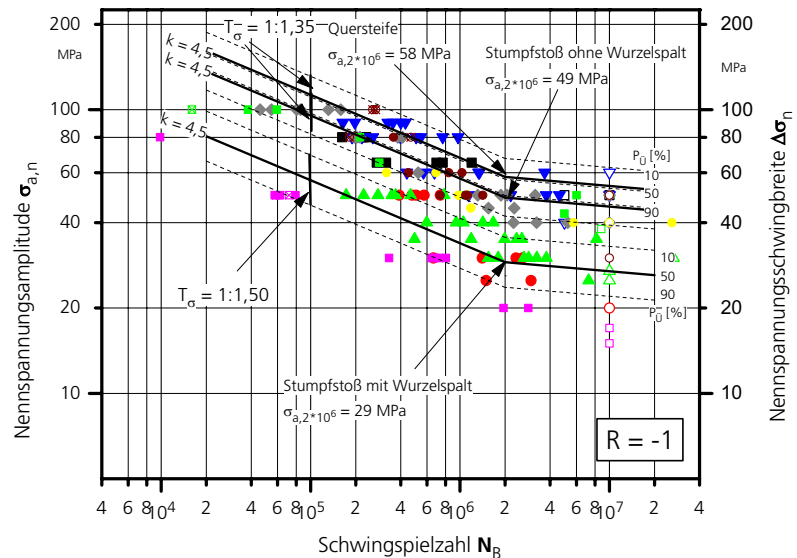


Bild 4.29: Schwingfestigkeitsergebnisse Schweißverbindungen – R = -1

Bei den Wöhlerlinien wurden die Versuchspunkte mit doppelseitiger Schweißung für die beiden Legierungen AlMgSi1 T6 (AW-6082) und AlMg4,5Mn (AW-5083) jeweils für die Stumpfstöße mit Wurzelspalt und die Stumpfstöße ohne Wurzelspalt zusammengefasst und es wurde eine einheitlichen Neigung von $k = 4,5$ für $R = -1$ und $k = 6,0$ für $R = 0$ angegeben. Die Auftragung im Wöhlerdiagramm erfolgte im Nennspannungssystem getrennt für $R = -1$, Bild 4.29, und $R = 0$, Bild 4.30. Der Abknickpunkt wurde einheitlich auf $2 \cdot 10^6$ Schwingspiele gelegt. Die Ergebnisse mit den Quersteifen und mit den einseitigen Schweißungen wurden zum Vergleich eingetragen. Es konnten die Ergebnisse beider Legierungen in ein Streuband mit $T_\sigma = 1 : 1,50$ für die Stumpfstöße mit Wurzelspalt und mit $T_\sigma = 1 : 1,35$ für die Stumpfstöße ohne Wurzelspalt zusammengefasst werden. Dies ist möglich, weil die Verbindungen beider Legierungen jeweils ähnliche Kerbschärfen aufweisen. Die Quersteife hat dagegen eine mildere Kerbe als die Stumpfstoßverbindungen ohne Wurzelspalt und liegt damit in der Schwingfestigkeit über dieser, Tabelle 4.5. Der erwartete Größeneinfluss [Rad95], die Schwingfestigkeit der 5 mm dicken Schweißproben sei höher als die der 25 mm dicken Proben, ist nur für scharf gekerbte Verbindungen mäßig ausgeprägt. Bei mild gekerbten Verbindungen ohne Wurzelspalt unterscheidet sich die Schwingfestigkeit zwischen 5 mm und 25 mm dicken Proben im Rahmen der vorliegenden Streuungen nicht.

Schweißverfahren: MIG
 Belastung: axial, lastgesteuert, $f=25-30\text{ s}^{-1}$
 Umgebung: Luft
 Dicke t: 5 mm

Werkstoff: AlMg4,5Mn (AW-5083)
 ■ □ ⊠ Stumpfstoß ohne Wurzelspalt
 ● ○ ⊙ Stumpfstoß mit Wurzelspalt

Werkstoff: AlMgSi1 T6 (AW-6082 T6)
 ◆ ◇ ⊞ Stumpfstoß ohne Wurzelspalt
 ▲ △ ⊕ Stumpfstoß mit Wurzelspalt
 ▼ ▽ ⊗ Quersteife

Werkstoff: AlMg4,5Mn0,7 (AW-5083), Charge B
 ■ □ ⊠ Stumpfstoß ohne Wurzelspalt
 ● ○ ⊙ Stumpfstoß mit Wurzelspalt
 Einseitige Schweißung

Werkstoff: AlMgSi0,7 T6 (AW-6005A)
 ■ □ ⊠ Stumpfstoß ohne Wurzelspalt
 ● ○ ⊙ Stumpfstoß mit Wurzelspalt
 Einseitige Schweißung

Werkstoff: AlMg4,5Mn (AW-5083)
 Dicke t: 25 mm
 ● ○ ⊠ Stumpfstoß ohne Wurzelspalt
 ■ □ ⊠ Stumpfstoß mit Wurzelspalt

Bruch (volles Symbol)
 Durchläufer (offenes Symbol)
 hochgesetzter Durchläufer (Symbol mit Kreuz)

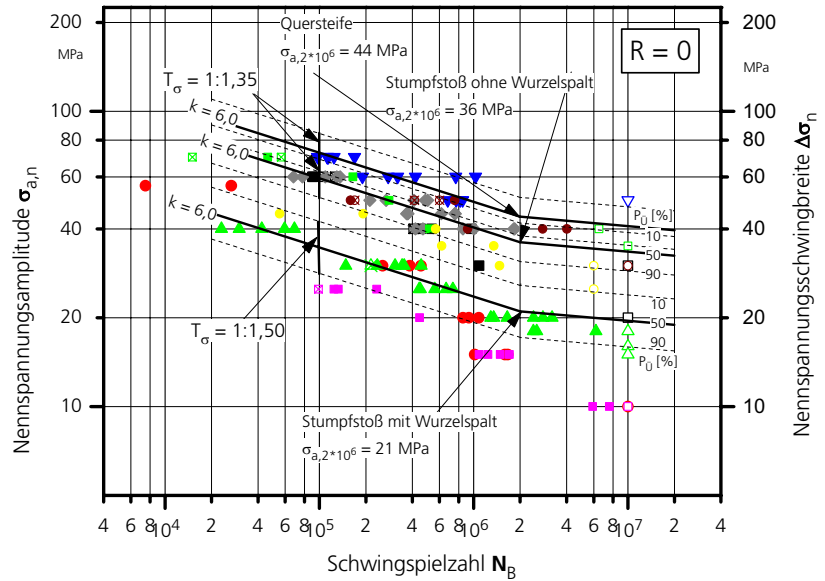


Bild 4.30: Schwingfestigkeitsergebnisse Schweißverbindungen – R = 0

Die ertragene Spannungsamplitude nimmt mit steigender Mittelspannung (Siehe Gl. 4.3, Abschnitt 4.1.2) ab, d.h. unter wechselnder Beanspruchung sind die Schwingfestigkeitswerte höher als unter schwellender. Die Mittelspannungsempfindlichkeiten fallen mit $M = 0,31$ bis $0,38$ für die untersuchten Verbindungen ähnlich aus und entsprechen den in der Literatur üblichen Werten, z.B.[Son01, Wer01, Hai02].

Schweißprobe	R=-1		R=0		M
	$\sigma_{a,K}$ [MPa]	$k_{50\%}$	$\sigma_{a,K}$ [MPa]	$k_{50\%}$	
Stumpfstoß ohne Wurzelspalt, t = 5 mm	49	4,5	36	6,0	0,36
Quersteife, t = 5 mm	58	4,5	44	6,0	0,31
Stumpfstoß mit Wurzelspalt, t = 5 mm	29	4,5	21	6,0	0,38

Tabelle 4.5: Kennwerte der Wöhlerlinien für Schweißverbindungen, Blechdicken: t = 5 mm